

基于物联网的桥梁预制构件运输与吊装全过程追踪管理系统

雒国锋

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 基于物联网的桥梁预制构件运输与吊装全过程追踪管理系统,融合RFID、UWB等多技术实现构件身份标识与溯源。通过感知层设备实时采集运输、吊装数据,经网络层传输,平台层处理分析。具备构件追踪、运输监控、吊装安全控制等功能,利用数据分析与决策支持模块挖掘数据价值。经开发验证,系统实时性、可靠性佳,能有效提升管理效率,保障作业安全,获用户高度认可。

关键词: 物联网;桥梁预制构件运输;吊装全过程;追踪管理系统

引言: 在大型桥梁建设中,预制构件的运输与吊装是关键环节,其效率与安全性直接影响工程进度与质量。传统管理方式存在信息滞后、监控盲区多、协同困难等问题,难以满足精细化施工需求。基于此,本文提出基于物联网的桥梁预制构件运输与吊装全过程追踪管理系统,通过多技术融合与数据智能分析,实现全流程可视化管控,为桥梁建设数字化升级提供创新解决方案。

1 系统需求分析与总体设计

1.1 桥梁预制构件管理核心需求

(1) 构件身份标识与溯源需求:需采用RFID、二维码、UWB多技术融合方案,实现构件从生产到安装全生命周期唯一标识,支持远距离快速识别(UWB识别距离 $\geq 10\text{m}$)与近距离精准溯源(二维码/RFID误差 $\leq 1\text{cm}$),满足不同场景下身份核验需求。(2) 运输过程监测需求:实时采集位置(定位精度室外 $\leq 5\text{m}$ 、室内 $\leq 0.3\text{m}$)、震动(采样频率 $\geq 100\text{Hz}$,量程 $\pm 16\text{g}$)、温湿度(温度 $-40\sim 85^\circ\text{C}$,湿度 $0\sim 100\%\text{RH}$)数据,当震动超阈值($\geq 3\text{g}$)或温湿度偏离正常范围(温度 $5\sim 35^\circ\text{C}$,湿度 $30\sim 70\%\text{RH}$)时,自动触发声光报警。(3) 吊装作业安全控制需求:实时监测构件姿态(倾角误差 $\leq 0.5^\circ$)、载荷(测量精度 $\pm 1\%\text{FS}$)及环境参数(风速 ≥ 6 级时预警),当出现姿态失衡(倾角 $> 5^\circ$)或超载(超额定值 10%)时,立即切断吊装操作信号。(4) 多方协同信息共享需求:搭建权限分级的信息共享平台,建设方可查看全流程数据,物流方可更新运输状态,施工方可上传吊装记录,数据更新延迟 $\leq 10\text{s}$,确保多方实时协同。

1.2 系统总体架构设计

(1) 感知层:GPS模块用于室外定位(定位精度

$\leq 5\text{m}$),IMU传感器采集姿态与震动数据(采样率 100Hz),压力传感器监测吊装载荷(量程 $0\sim 50\text{t}$),温湿度传感器部署于运输车厢(测量精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 3\%\text{RH}$),所有设备支持低功耗模式(续航 $\geq 72\text{h}$)。(2) 网络层:5G用于高速移动场景(传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$),LoRa用于远距离低功耗传输(通信距离 $\geq 3\text{km}$),NB-IoT用于固定场景数据上传(功耗 $\leq 10\mu\text{A}$),采用混合组网策略,自动切换最优通信链路,确保数据传输成功率 $\geq 99.9\%$ 。(3) 平台层:边缘节点部署于施工现场(数据处理延迟 $\leq 50\text{ms}$),预处理感知数据并过滤冗余信息;云端平台用于数据存储与分析(存储容量 $\geq 10\text{TB}$),采用分布式架构支持 $1000+$ 设备同时接入,边-云协同实现数据分级处理。(4) 应用层:PC端管理后台支持数据可视化(实时曲线、统计报表)、设备管理(远程配置、故障诊断)及权限管理(3级权限分级);移动端APP支持扫码溯源、现场拍照上传(图片压缩至 $\leq 2\text{MB}$)及离线数据缓存(缓存容量 $\geq 1\text{GB}$)^[1]。

1.3 关键技术选型

(1) 定位技术:采用UWB+GPS融合定位,室外通过GPS获取位置信息(更新频率 1Hz),室内切换UWB定位(定位精度 $\leq 0.3\text{m}$,更新频率 10Hz),通过卡尔曼滤波消除定位噪声,融合后定位误差 $\leq 0.5\text{m}$,确保全场景定位连续性。(2) 数据融合:针对GPS、IMU、压力传感器等多源异构数据,采用卡尔曼滤波算法进行数据融合,建立状态方程与观测方程,实时修正测量误差,数据融合后姿态测量精度提升 30% ,载荷测量误差降低至 $\pm 0.8\%\text{FS}$ 。(3) 智能算法:吊装路径规划采用A*算法优化,以路径长度、障碍物规避、吊装时间为代价函数,

生成最优吊装路径（路径规划时间 $\leq 1s$ ），对比传统算法，路径优化率提升20%，吊装效率提高15%。

2 系统功能模块设计与实现

2.1 构件身份识别与追踪模块

（1）RFID标签编码规则与抗金属干扰设计：采用18位编码规则，前6位为生产厂商代码、中间8位为构件唯一ID、后4位为生产批次，确保全生命周期唯一标识；标签选用超高频抗金属型号，外壳采用ABS材质封装（厚度 $\geq 2mm$ ），内置ferrite屏蔽层，在金属构件表面识别距离仍 $\geq 5m$ ，解决传统标签金属环境失效问题。（2）电子围栏技术实现区域权限管控：通过GIS系统划定构件存储区、运输途经区、吊装作业区等电子围栏，支持多边形/圆形围栏绘制（精度 $\leq 1m$ ）；设置三级权限，仅授权物流车辆可进入运输途经区，施工人员刷卡后才能进入吊装作业区，越界时触发声光报警（响应时间 $\leq 1s$ ），并同步推送预警信息至管理端^[2]。（3）区块链技术确保数据不可篡改：采用联盟链架构，建设方、物流方、施工方作为节点参与共识，构件身份、运输记录、吊装数据等关键信息上链存储（区块生成时间 $\leq 10s$ ）；通过哈希算法对数据加密，每笔记录关联前一区块哈希值，可追溯数据修改痕迹，保障全流程数据可信度。

2.2 运输过程监控模块

（1）实时轨迹追踪与异常停留报警：结合GPS与基站定位，轨迹更新频率 $\geq 1次/30s$ （高速场景）、1次/1min（低速场景），地图显示精度 $\leq 10m$ ；设置异常停留阈值（默认 $\geq 30min$ ），停留时自动分析周边环境（如非服务区/禁行区），10s内推送报警信息，支持管理人员远程问询确认。（2）运输环境监测：温湿度传感器每5min采集1次数据（温度范围-40~85℃，湿度0~100%RH，误差 $\leq \pm 0.5℃/\pm 3\%RH$ ），震动传感器实时监测（量程 $\pm 16g$ ，采样率100Hz），按振幅划分5级震动等级；数据超预设阈值（如温度 $> 35℃$ 、震动 ≥ 3 级）时，自动触发车厢通风或提醒驾驶员减速。（3）能耗分析与最优路径推荐：基于历史运输数据（油耗、里程、时长）建立能耗模型，实时计算当前运输能耗（误差 $\leq 5\%$ ）；结合实时路况（拥堵指数、限速信息），通过Dijkstra算法推荐最优路径，对比传统路径能耗降低8%~12%，运输时间缩短10%~15%^[3]。

2.3 吊装作业安全控制模块

（1）吊具姿态实时监测：倾角仪安装于吊具顶部（测量范围 $\pm 30^\circ$ ，精度 $\leq 0.1^\circ$ ），实时采集水平/垂直倾角；激光测距仪（测量范围0.5~50m，精度 $\leq \pm 2mm$ ）监测吊具与构件、构件与桥面距离，数据每200ms更新

1次，在管理界面动态显示姿态变化曲线。（2）载荷超限预警与紧急制动机制：拉力传感器实时采集吊装载荷（量程0~100t，精度 $\leq \pm 1\%FS$ ），当载荷达到额定值90%时发出声光预警，达到105%时自动切断吊装设备控制信号，触发紧急制动（制动响应时间 $\leq 500ms$ ），同时锁定操作权限，需管理人员解锁后才能重启。（3）风速/雨量等环境因素联动控制：部署户外气象站（风速测量范围0~60m/s，精度 $\leq \pm 0.3m/s$ ；雨量测量范围0~4mm/min，精度 $\leq \pm 0.1mm$ ），风速 $\geq 10.8m/s$ （6级）或雨量 $\geq 2mm/min$ 时，系统自动禁止吊装作业，已启动作业则提示紧急降落，确保恶劣天气下作业安全。

2.4 数据分析与决策支持模块

（1）历史数据挖掘：基于近12个月运输数据，分析不同路线平均时效（误差 $\leq 3\%$ ）、常见延误原因（如拥堵、设备故障）；挖掘构件故障模式，统计运输中震动超标导致的构件损伤率、吊装中姿态异常引发的故障次数，生成故障原因占比饼图，为设备改进提供依据。

（2）吊装效率评估模型：建立包含吊装时长（单构件平均吊装时间）、设备利用率（设备工作时长/总时长）、安全达标率（无预警作业次数/总次数）的KPI体系，采用层次分析法确定权重，自动计算月度/季度效率得分（满分100分），得分 < 80 分时生成改进建议。（3）可视化驾驶舱设计：导入桥梁BIM模型，实现构件运输、吊装过程3D动态映射（与实际场景延迟 $\leq 2s$ ）；数据仪表盘实时展示核心指标，包括运输车辆在线率、吊装作业安全率、构件溯源完成率等，支持钻取查询（如点击安全率可查看具体预警记录），助力管理人员直观掌握系统运行状态^[4]。

3 系统开发与验证

3.1 硬件选型与集成测试

（1）传感器精度对比实验：选取3款不同量程加速度计（ $\pm 8g$ 、 $\pm 16g$ 、 $\pm 32g$ ），在模拟运输震动环境（0.5-50Hz）下测试，结果显示 $\pm 16g$ 量程传感器测量误差 $\leq 2\%$ ，既能覆盖构件运输最大震动（约8g），又比 $\pm 32g$ 量程精度高15%，最终选定该型号；同步测试温湿度传感器，在-20~60℃区间内，选定型号误差 $\leq \pm 0.4℃$ 、 $\pm 3\%RH$ ，满足运输环境监测需求。（2）通信模块稳定性测试：在城市道路、郊区高速、山区隧道3类场景下，对5G、LoRa、NB-IoT模块进行72小时连续测试。5G模块在城市/高速场景丢包率 $\leq 0.5\%$ 、延迟 $\leq 20ms$ ，隧道场景切换至LoRa后丢包率 $\leq 1.2\%$ 、延迟 $\leq 100ms$ ；NB-IoT模块在固定点位丢包率 $\leq 0.3\%$ ，混合组网后整体通信稳定性达标。（3）电源管理方案：采用10W柔性太阳能板

(转换效率 $\geq 22\%$) 搭配12V/100Ah锂电池, 在光照 $\geq 4\text{h/d}$ 时可实现电量自给, 无光照时锂电池续航 $\geq 72\text{h}$; 设计低功耗模式, 非工作状态下传感器休眠电流 $\leq 10\mu\text{A}$, 通信模块间隔30s唤醒一次, 进一步延长续航。

3.2 软件平台实现

(1) 前端开发: 采用Vue.js框架, 结合ElementPlus组件库构建响应式界面, 支持PC端(分辨率 $\geq 1366\times 768$) 与移动端(适配Android/iOS)自适应显示; 通过ECharts实现数据可视化, 图表加载时间 $\leq 1.5\text{s}$, 操作响应延迟 $\leq 300\text{ms}$, 提升用户交互体验。(2) 后端架构: 基于SpringCloud微服务架构, 拆分设备管理、数据采集、报警处理、报表生成4个服务, 各服务独立部署、弹性扩容; 采用Nacos实现服务注册与配置中心, Feign实现服务间调用, Sentinel进行流量控制, 保障系统高可用。(3) 数据库设计: 时序数据库InfluxDB存储监测数据(单条记录写入时间 $\leq 1\text{ms}$), 支持按时间范围快速查询(查询1个月数据耗时 $\leq 3\text{s}$); MySQL存储用户信息、设备档案等结构化数据, 采用主从复制架构, 数据备份频率为每日1次, 确保数据安全。

3.3 典型场景验证

3.3.1 案例1: 某跨江大桥预制梁运输仿真测试

(1) 路径优化效果: 模拟3条运输路线, 系统推荐的“高速+沿江公路”路线, 相比传统路线减少2个拥堵路段, 运输时间从6.5h缩短至5.5h, 缩短幅度达15%, 油耗降低约12%。(2) 震动报警准确率: 在运输过程中设置10次模拟震动(4-6级), 系统均准确触发报警, 报警响应时间 $\leq 2\text{s}$, 准确率达100%; 误报次数为0, 满足实际应用需求。

3.3.2 案例2: 桥塔节段吊装现场实测

(1) 姿态调整响应时间: 当吊具倾角出现 3° 、 5° 偏差时, 系统实时反馈并提示调整, 操作指令下发后, 吊具姿态调整到位时间分别为1.2s、1.8s, 均小于2s, 响应及

时。(2) 安全隐患识别率: 现场模拟载荷超10%、风速达7级、吊具倾斜 6° 3类隐患, 系统均100%识别并触发预警/制动, 未出现漏判情况, 安全控制有效。

3.4 系统性能评估

(1) 实时性指标: 传感器数据采集频率 $\geq 10\text{Hz}$, 经边缘计算处理后, 云端更新频率 $\leq 1\text{s}$, 前端界面数据刷新延迟 $\leq 500\text{ms}$, 满足实时监控需求。(2) 可靠性指标: 系统连续运行30天(720h)无故障, 折算平均无故障工作时间(MTBF) $\geq 5000\text{h}$, 核心硬件(传感器、通信模块)故障率 $\leq 0.2\%$, 软件无崩溃情况。(3) 用户满意度调查: 向建设方、物流方、施工方共50名用户发放问卷, 满意度达92%, 其中施工方对吊装安全控制模块满意度最高(96%), 反馈其有效降低了作业风险。

结束语

基于物联网的桥梁预制构件运输与吊装全过程追踪管理系统, 通过多源感知、智能分析与多方协同, 有效解决了传统管理模式中的信息孤岛、响应滞后与安全风险等问题。实际应用表明, 该系统显著提升了运输效率、降低了吊装事故率, 并为工程数字化管理提供了可复制的技术范式。未来, 随着5G与AI技术的深化应用, 系统将进一步优化决策支持能力, 推动桥梁建设向智能化、精细化方向持续演进。

参考文献

- [1]刘攀攀.基于工业机器人的桥梁预制构件智能建造实践[J].城市道桥与防洪,2025,(02):161-166.
- [2]陈宁,李江.城市桥梁预制构件场的规划布局[J].建筑技术开发,2021,(14):114-116.
- [3]傅晨曦,周青,韩大章,宋军.桥梁下部结构预制构件运输综合评定方法[J].公路,2020,(11):236-239.
- [4]林青.预制构件运输及吊装路径优化系统研究[J].艺术设计,2025,(08):94-96.